

**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN REDES RESIDENCIALES**

**SEBASTIAN CARRASQUILLA BECERRA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PEREIRA**

**2017**

# **ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN REDES RESIDENCIALES**

**SEBASTIAN CARRASQUILLA BECERRA**

Modalidad Práctica de extensión- Práctica Universitaria

**Director: MSc. JORGE HUMBERTO SANZ ALZATE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PEREIRA, 2017**

## **RESUMEN**

En este trabajo se realiza una serie de mediciones para determinar el impacto de los elementos no lineales en redes eléctricas de tipo residencial basado en IEEE Std 519™-2014 así mismo el análisis en cuanto a la viabilidad de tener en cuenta estos fenómenos para el diseño de dichas redes considerando la aplicación de factores de aumento (filtros en casos especiales) con el fin de reducir el efecto de la distorsión armónica. Finalmente, basados en las mediciones y postulados de la NTC2050 para el diseño, determinar si realmente es necesaria la implementación de medidas para mitigar este efecto o si resulta ser no factible para todos los involucrados (empresa de energía, cliente).

# CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1	<i>Estado del arte .....</i>	<i>9</i>
<b>2</b>	<b>FORMULACIÓN DEL PROBELMA.....</b>	<b>12</b>
2.1	<i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</i>	<i>12</i>
2.2	<i>OBJETIVOS.....</i>	<i>13</i>
2.2.1	<i>Objetivo General.....</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>13</i>
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
3.1	<i>DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS.....</i>	<i>14</i>
3.2	<i>ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS .....</i>	<i>14</i>
3.3	<i>CLASIFICACIÓN DE LOS ARMÓNICOS.....</i>	<i>15</i>
3.3.1	<i>Fuentes de los Armónicos.....</i>	<i>16</i>
3.4	<i>EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS.....</i>	<i>19</i>
3.5	<i>EFFECTOS PROVOCADOS POR LAS CORRIENTES ARMÓNICAS .....</i>	<i>21</i>
3.6	<i>DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL .....</i>	<i>22</i>
3.7	<i>DISTORSIÓN TOTAL DE DEMANDA.....</i>	<i>23</i>
3.8	<i>FACTOR K.....</i>	<i>23</i>
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
4.1	<i>PROCEDIMIENTOS PARA REALIZAR EL ESTUDIO .....</i>	<i>25</i>
4.2	<i>NORMAS APLICADAS AL DISEÑO DE REDES DE TIPO RESIDENCIAL.....</i>	<i>28</i>
<b>5</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA EL DIAGNOSTICO DE ARMÓNICOS EN LA INSTALACIÓN ELECTRICA.....</b>	<b>29</b>
5.1	<i>OBJETIVO.....</i>	<i>29</i>
5.2	<i>ESQUEMA ELÉCTRICO.....</i>	<i>29</i>

5.2.1	Características del transformador de potencia .....	30
5.2.2	Nivel de trabajo o demanda durante la medida .....	30
5.2.3	Puntos de medición .....	32
5.2.4	Existencia de cargas monofásicas.....	32
<b>6</b>	<b>INTERPRETACIÓN DE DATOS MEDIDOS.....</b>	<b>33</b>
6.1	<i>ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA TENSIÓN. ....</i>	<i>33</i>
6.2	<i>ANÁLISIS DEL DISEÑO DE REDES ELÉCTRICAS RESIDENCIALES SEGÚN LA NORMA ACTUAL (NTC2050)</i>	<i>41</i>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de armónicos .....	15
Tabla 2 Clasificación de armónicos en contracción .....	15
Tabla 3 Clasificación de Fuentes Armónicas de acuerdo a la carga No-lineal .....	17
Tabla 4 Resumen del momento más crítico tomado por el equipo FLUKE 434.....	30
Tabla 5 Límites de distorsión armónica de tensión .....	34
Tabla 6 Límites de distorsión de la corriente para sistemas entre 120V y 69kV[4].....	35
Tabla 7 impedancias aguas arriba.....	37
Tabla 8 . impedancias del transformador.....	37
Tabla 9 impedancias del barraje y el interruptor .....	38
Tabla 10 Icc Max en el tablero general de baja tensión .....	38
Tabla 11 Corriente de carga durante la distorsión armónica .....	41
Tabla 12 Memorias de cálculo edificio (estimación del transformador) .....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Procedimientos para realizar el estudio. [11] .....	26
Figura 2 Proceso de diagnóstico de la instalación. [10] .....	27
Figura 3 Diagrama Unifilar .....	29
Figura 4 demanda de potencia aparente durante la noche de mayor demanda.....	31
Figura 5 demanda de potencia aparente durante la noche de mayor demanda.....	31
Figura 6 . THD de tensión y armónicos individuales de tensión, armónico individual de la corriente expresado como porcentaje de IL.....	31
Figura 7 Armónico individual de tensión más alto.....	34
Figura 8 THD de tensión más alto.....	35
Figura 9 Máximo porcentaje armónico individual de la corriente .....	40
Figura 10 Momento exacto de ocurrencia del armónico .....	40

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el crecimiento sustancial de los dispositivos electrónicos, destinados a equipar las instalaciones, ha dado lugar a un cambio significativo de los tipos de cargas conectadas al sistema de distribución eléctrico [1].

No ha pasado mucho tiempo desde que la única preocupación que había para utilizar la energía eléctrica en los hogares, establecimientos y centros productivos era simplemente tener tensión, sin importarnos otra cosa que los diferentes equipos y dispositivos que teníamos funcionaran.

En los sectores residenciales, comercial y público es también notable el aumento de la contaminación armónica en las redes de distribución debido a la cada vez mayor difusión de equipamiento con respuesta a lineal. Las fuentes conmutadas para aparatos de televisión y equipos de computación, los balastos electrónicos sin filtros, los cargadores de baterías para centrales telefónicas o las fuentes ininterrumpibles son sólo algunos de los ejemplos que podemos mencionar [2].

El efecto de los componentes armónicos sobre el equipamiento electrónico de regulación, medición, protección y control es frecuentemente la causa de serios problemas. Estos dispositivos que están equipados con rectificadores, moduladores, etc., distorsionan la forma de onda de la corriente para su correcto funcionamiento. También es notable el aumento de la corriente por el conductor neutro de los sistemas trifásicos tetrafilares, más allá de lo que sugieren posibles desequilibrios de las cargas.

Con el fin de analizar los armónicos en las redes residenciales producidas por equipamiento no lineal es necesario documentarse con un estándar de normas que permitan establecer límites, como lo es la IEEE Std 519™-2014 con el propósito mejorar así el servicio.



## 1.1 Estado del arte

En un sistema eléctrico ideal la energía generada y suministrada con ondas de tensión y corriente, son senoidales a una sola frecuencia, pero en los sistemas reales lo anterior no es aplicable, ya que existen elementos internos y externos a la red eléctrica, que producen distorsiones armónicas de corrientes y posteriormente de tensiones. La generación de estos armónicos se debe a la proliferación de dispositivos de electrónica de potencia en los sistemas eléctricos. También el hecho de que existen otros factores que contribuyen de manera indirecta como son; las condiciones precarias de sus instalaciones, la falta de un mantenimiento correctivo y preventivo, condiciones climáticas (descargas) que incrementan la inyección de estas corrientes. Por lo tanto a continuación se presentan los trabajos más relevantes entorno al estudio de esta temática.

En agosto de 2010 Cristian Valenzuela V. Y Rodolfo Vidal en [3], Presentan el tema: Estudio de contaminación armónica en la universidad del Bio-Bio, en la concepción de Chile. En resumen el estudio de contaminación armónica que se presento fue realizado en las redes eléctricas de la Universidad del Bio - Bio, Campus Concepción. Las redes constan de 2 empalmes conectados a una línea de 15 kV y 8 transformadores alimentando principalmente cargas de iluminación e informáticas. Para el desarrollo de las mediciones se utilizó el analizador industrial marca «Dranetz», POWER XPLOER PX5 y el software DRAN VIEW 6.0. Las mediciones se realizaron desde el 31 de Agosto al 9 de Septiembre del 2009 en un período de 8 horas continuas por Subestación, comprendidas entre las 09:00 a 17:00 horas. Este período de mediciones es sólo una aproximación a los niveles reales de polución armónica que deberían realizarse según la Norma Chilena, pero este estudio en cuanto a su comprensión y cuantificación no es afectado por el periodo de mediciones adoptado.

El autor después de haber desarrollado este trabajo observo que existen varios puntos que exceden a la Norma, situación que pudiera afectar el normal funcionamiento de otras cargas conectadas a la instalación. El Autor llega a las Siguietes conclusiones: Que los períodos de medición son una aproximación a los niveles reales de fuentes armónicas que deben de estar Normados según la norma Chilena. Los resultados de las mediciones que obtuvo el

autor fueron comparados con normas y estándares, que entregan ciertos límites de contaminación armónica máxima. El Autor utilizó para el desarrollo esta tesis dos programas que son POWER XPLOER PX5 y el software DRAN VIEW 6.0.

En Diciembre de 2001, Johan Lundquist en [4], presentan el tema: [4], presentado en Göteborg.

En resumen la investigación desarrollada en esta tesis se refiere principalmente a las fuentes de distorsión (cargas) y la interacción entre las personas y la propagación de la distorsión en el sistema de alimentación. También se desarrollan los efectos sobre el sistema de energía, por ejemplo, pérdidas adicionales, resonancia armónica y los costos financieros relacionados con este. Además, los mecanismos que afectan el flujo de armónicos de potencia activa, en un cierto punto, se muestran. Un nuevo mecanismo en relación con la interacción armónica de corriente en sistemas de transmisión de alta tensión, debido a una diferencia en el ángulo de fase de la tensión fundamental entre dos nodos, se aborda. Las conclusiones son que las cargas no lineales generan distorsión de corriente de hasta 200 % THD (Distribución Total Armónica). La tendencia de las cargas modernas es una reducción de los armónicos de orden inferior, por debajo de 1 kHz, y un aumento de componentes de frecuencia más altas, de hasta 100 kHz. La distorsión de la corriente disminuye a niveles de tensión más altos, en torno al 5% THD, principalmente debido a la mezcla con cargas pasivas, sino también debido a la interacción actual entre monofásicos y trifásicos cargas no lineales. La distorsión de la tensión es también más alta en niveles de baja tensión, en su mayoría por debajo del 6 % THD, y disminuye por debajo del 2 % a los niveles de tensión más altos. El Autor llega a las siguientes conclusiones: El autor menciona que las cargas no lineales generan distorsiones de corriente hasta un valor de 200 % THD (Distribución total Armónica). La distorsión de la tensión es también más alta en niveles de baja tensión. Las pérdidas adicionales son globalmente pequeña.

En julio de 1996, Gilberto Reyes Calderón en [5], presenta el Tema: Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica, en la Universidad Autónoma de Nuevo León en San Nicolás de los Garza. En Resumen el estudio de las fuentes armónicas es un tema de creciente interés debido a los efectos que ocasionan en las redes de distribución eléctrica;

también ocasionan interferencias con los equipos de medición, protección, control y comunicación. El autor de esta Tesis pretende dar a conocer las fuentes y efectos principales de los armónicos en la red eléctrica y los equipos industriales utilizados en la transformación y aprovechamiento de la energía eléctrica, así como también exponer una metodología básica de análisis del problema armónico y los medios de supresión. Normalmente las armónicas no se eliminan completamente sino que se reducen sólo a niveles permisibles y seguros, normalizados por estándares, como los límites establecidos por el std. 519 del IEEE. En los siguientes estudios de armónicos se modelan los equivalentes de la red eléctrica mediante paquetes computacionales con los que se obtiene valiosa información del comportamiento de la red ante fuentes armónicas, en este trabajo se expone un análisis básico mediante el paquete PSPICE. El autor llega a las siguientes conclusiones: El autor señala que las fuentes armónicas son un tema que afectan directamente a las redes de distribución eléctrica. Es importante el conocimiento de las fuentes y de los efectos principales de los armónicos en la red, ya que son utilizados en la transformación y aprovechamiento de la energía eléctrica. Se plantean que los niveles de armónicos no se eliminan en su totalidad sino que se reducen sólo a niveles permisibles y seguros.

## **2 FORMULACIÓN DEL PROBELMA**

En este capítulo la formulación general del problema de análisis de armónicos en redes residenciales.

### **2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Idealmente, tanto la tensión en un barraje de suministro de energía eléctrica como la corriente resultante deben presentar formas de onda perfectamente senosoidales. En la práctica estas formas de onda están distorsionadas, por causa de los armónicos, los cuales son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental, la suma de estas señales da como resultado la señal distorsionada original, siendo esta 60 Hz, y los armónicos que más se generan en los sistemas eléctricos son los de orden impar, tales como 180 Hz el tercer armónico, 300 Hz el quinto armónico, 420 Hz el séptimo armónico y así sucesivamente.

La distorsión armónica en los sistemas de potencia no es un fenómeno nuevo, los esfuerzos para limitarla a proporciones aceptables ha sido el interés de ingenieros de potencia desde los primeros días de los sistemas de distribución. En ese entonces, la distorsión era ocasionada típicamente por la saturación magnética de transformadores o por ciertas cargas industriales, tales como hornos o soldadores de arco. El mayor interés eran los efectos de los armónicos sobre motores sincrónicos y de inducción, interferencia telefónica, y fallas en capacitores de potencia. En el pasado, los problemas de armónicos podían ser tolerados porque los equipos tenían un diseño conservador y las conexiones Estrella aterrizada - delta de los transformadores que se usaron para cancelar los armónicos del lado primario al secundario o viceversa [6].

Este documento se tratará en el análisis de armónicos en las zonas residenciales para documentar los efectos de la distorsión armónica y posibles soluciones siguiendo premisas de la norma IEEE Std 519™-2014.

## **2.2 OBJETIVOS**

### **2.2.1 Objetivo General**

Desarrollar un análisis de armónicos en instalaciones eléctricas de tipo residencial apoyado en la norma IEEE Std 519™-2014 y determinar su verdadero impacto sobre dichas redes considerando su diseño bajo la norma NTC2050.

### **2.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar de medición de variables eléctricas con el equipo FLUKE 434 es una edificación de tipo residencial diseñada bajo la NTC2050.
- Reconocer y clasificar los fenómenos de la distorsión armónica presentes en el sistema (si es que existen).
- Analizar posibles soluciones (si es necesario) en medida del impacto de la distorsión armónica existente en el sistema.
- Recolectar información detallada del diseño eléctrico previo a la construcción del edificio.
- Verificar si realmente es necesario tomar medidas para mitigar el efecto de la distorsión armónica durante la etapa de diseño de una red tipo residencial que se encuentra dentro del marco de la NTC 2050

### **3 MARCO TEÓRICO**

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales a la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como generación de armónicos. Los armónicos son un fenómeno que causa problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red.

#### **3.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS**

Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que poseen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. La forma de onda distorsionada puede ser descompuesta en una suma de la señal de frecuencia fundamental y sus múltiplos. La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas de un sistema de potencia [7].

#### **3.2 ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS**

En un sistema eléctrico, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa, así como por los clientes están diseñados para operar 60 Hertz, con una tensión y una corriente senoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias diferentes de 50 o 60 Hertz, conocidos como armónicos, que son normalmente definidos como las distorsiones periódicas de la forma de onda de tensión y/o corrientes de un estado estable en los sistemas eléctricos.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de tensiones no senoidales en diferentes puntos del sistema. Estos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de tensión de formas que obliga en los nodos del sistema, no lleguen tensiones

puramente senoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico, más distorsionadas serán las tensiones en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

En general, los armónicos son producidos por cargas no-lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la frecuencia). Estas cargas no-lineales a pesar de ser alimentadas con una señal senoidal, devuelven una señal no senoidal a través del neutro, y se puede considerar como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red. En la mayoría de los casos los armónicos son un disturbio en estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios.

### 3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ARMÓNICOS

Cada armónico está asociado con cada nombre, frecuencia y secuencia, de la siguiente forma:

**Tabla 1 Clasificación de armónicos**

Nombre	Fundamental	2°	3°	4°	5°	6°	7°
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+

Normalmente, las ondas que circulan por la red tienen las mismas componentes positivas que negativas (en forma simétrica), con lo cual no suelen aparecer armónicos de orden par. Así, lo habitual es encontrarse con:

**Tabla 2 Clasificación de armónicos en contracción**

Nombre	Fundamental	3°	5°	7°	9°	11°	13°
--------	-------------	----	----	----	----	-----	-----

Frecuencia	60	180	300	420	540	660	780
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+

La secuencia se refiere al sentido de giro de los fasores con respecto a la fundamental, expresado en otras palabras indica el sentido en que giraría el rotor de un motor, al ser excitado por esa señal. Secuencia directa (+) indica que el sentido de giro es el horario. Secuencia inversa (-) indica un sentido de giro antihorario. Secuencia cero (0) indica que no gira.

Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

- Secuencia (+): Rotación Directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- Secuencia (-): Rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y pueden quemar los motores de inducción trifásicos.
- Secuencia (0): Los armónicos de secuencia cero (llamados normalmente triplens) se suman al neutro de la red (si ésta es de cuatro hilos) y son los causantes de sobrecalentamientos.

### 3.3.1 Fuentes de los Armónicos

Las cargas no lineales pueden clasificarse, básicamente, en tres categorías; a continuación se presenta una lista con las más importantes.

A- Basadas en arcos y descargas eléctricas:

- Lámparas de descarga (fluorescentes, ahorradoras de energía, neón, vapores de sodio y mercurio, etc.)
- Soldadores de arco.
- Hornos de arco Eléctrico.



B- Basadas en inductancias saturables

- Transformadores,
- Motores.
- Reactancias para limitar los arcos de descarga.

C- Electrónicas

- Rectificadores para cargas resistivas e inductivas.
- Fuentes de alimentación (aparatos electrónicos domésticos y de oficina, variadores de frecuencia, sistemas de alimentación ininterrumpida, lámparas electrónicas, etc.)
- Reguladores y recortadores (variación de velocidad de pequeños motores, ahorradores de energía para motores, reguladores de luz, compensadores estáticos de energía reactiva (SVC, TCR), reguladores para dispositivos de caldeo, etc.)
- Cargadores de baterías
- Convertidor continuo-alterno sobre la red (energía solar, accionamientos con recuperación de energía, transmisión de energía en corriente continua, etc.)

Un resumen breve del comportamiento de algunas fuentes generadoras de armónicas, se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3 Clasificación de Fuentes Armónicas de acuerdo a la carga No-lineal**

<b>ELEMENTOS DEL SISTEMA ELECTRICO</b>	<b>CARACTERISTICA POR LA ARMONICA</b>	<b>ORDEN DE ARMONICA</b>	<b>SOLUCION PREVIA</b>
<b>TRANSFORMADOR TRIFASICOS</b>	Afecta la impedancia del transformador donde la onda senoidal no es simétrica con respecto	La distorsión se debe a las armónicas 3, 9,12, pero principalmente a la 3ra Armónica. También se puede	Proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples lo que generalmente se

<b>ELEMENTOS DEL SISTEMA ELECTRICO</b>	<b>CARACTERISTICA POR LA ARMONICA</b>	<b>ORDEN DE ARMONICA</b>	<b>SOLUCION PREVIA</b>
	a su valor máximo	presentar la Ferroresonancia debida a la Impedancia del transformador.	logra con una conexión en Y – $\Delta$
<b>MAQUINAS ROTATIVAS ( MAQUINA DE INDUCCIÓN Y SINCRONA)</b>	La distorsión afecta a la Fuerza Magnetomotriz fundamental (f.m.m), donde se produce debido a la armónica en el tiempo que son dependientes de la velocidad.	La distorsión se debe a la 5ta, 7ma armónica principalmente	
<b>HORNO DE ARCO ELÉCTRICO</b>	Por su gran gama de frecuencias, los niveles de armónicas varía en función del tiempo y a la misma componente fundamental.	De acuerdo con el porcentaje de distorsión respecto a la componente fundamental al inicio de la fundición tenemos <div> <div>2</div> <div>3</div> <div>4</div> <div>5</div> </div> <div>7</div> <div>7.7 5.8 2.5 9.2</div> <div>3.1</div>	

<b>ELEMENTOS DEL SISTEMA ELECTRICO</b>	<b>CARACTERISTICA POR LA ARMONICA</b>	<b>ORDEN DE ARMONICA</b>	<b>SOLUCION PREVIA</b>
<b>CONTROLADORES DE MOTORES DE CA</b>	En este caso depende del controlador, esto es si es de 6-pulsos o 12 pulsos, también si tiene inversor y filtró capacitivo.	Para un controlador de 6-pulsos se tiene 5a, 7a, 11a, 13a, 17a, 19a y si es de 12-pulsos tenemos orden de armónicas de 11a, 13a, 23a, 25a especialmente.	Los controladores deben ser de un número mayor de pulsos para generar armónicas de gran orden para no afectar demasiado la red.
<b>COMPENSADOR ESTATICO DE VAR.S</b>	El comportamiento depende del sistema de control de cada compensador como el usar Tiristores en el sistema trifásico.		Se puede eliminar con la conexión de los tiristores en delta

Fuente [8]

### 3.4 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

En los sistemas eléctricos, los Armónicos son a menudo usados para definir distorsiones de la onda senoidal, asociados con las amplitudes de corrientes y tensiones a frecuencias diferentes de la onda fundamental, que tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución.

Entre estos efectos, se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipo así como la degradación de su eficiencia y mal funcionamiento de los elementos (conductores, alimentadores, transformadores, subestaciones y las cargas.) de un sistema eléctrico en general. Otras características del efecto armónico con otros dispositivos del sistema

eléctrico. Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tiempo de la carga instalada como son los efectos instantáneos y a largo plazo.

A continuación describimos algunos de los principales problemas que pueden ocasionar los armónicos, en relación con el funcionamiento de los equipos eléctricos principales presentes en el sistema de distribución:

Transformadores: Aumento del nivel de pérdidas eléctricas, cobre y hierro; riesgo de saturación en la presencia de armónicos pares; reducción de la vida debido a la sobrecalentamiento y / o desgarramiento de la aislación.

- Maquinas Asíncronas: Aumento del nivel de calentamiento, en particular en los dobles de jaulas.
- Conductor Neutro: Calentamiento por encima de lo normal debido a la presencia de armónicos de secuencia cero. Los equipos electrónicos generan importantes niveles de armónicos tercero, quinto y séptimo orden, aparecen junto con los armónicos Triplens. Teniendo en cuenta un sistema trifásico equilibrado, los Triplens son de secuencia cero y por lo tanto se suman en el conductor neutro.
- Controles electrónicos: La distorsión en tensión puede también afectar de manera diversa a los controles electrónicos para conversión de potencia, controles de velocidad y fuentes de potencia. Muchos de estos equipos dependen de una señal exacta que cruce por el cero para generar la sincronización para el disparo de los tiristores. Cuando la onda de tensión está significativamente distorsionada, éstas señales de sincronía son inexactas y causan funcionamiento no predecible.
- Condensadores de potencia: Aumento del nivel de calentamiento; pérdida de aislación; y la pérdida de la vida.

- Cables y Conductores Eléctricos: Aumento del nivel de pérdidas óhmicas y dieléctricas, lo que lleva a la vida reducida.
- Interferencia en las comunicaciones: Las armónicas, por ser ondas a una mayor frecuencia, son más fácilmente irradiadas y pueden interferir con ciertos sistemas de comunicación o con señales electrónicas.
- Efectos sobre otros usuarios. Aunque los efectos causados por armónicas en alguna instalación eléctrica puedan ser despreciables, son capaces de provocar problemas a otros usuarios conectados a la misma red. Es por eso que las compañías suministradoras han establecido o están estableciendo límites máximos a los niveles de armónicas que un usuario puede inyectar a la red. Internacionalmente existe una gran cantidad de estándares para limitar los efectos de las armónicas, tanto para el funcionamiento de la red eléctrica como para la seguridad de los usuarios y sus instalaciones.

### **3.5 EFECTOS PROVOCADOS POR LAS CORRIENTES ARMÓNICAS**

Los efectos nocivos producidos por el flujo de armónicos son cada día más significativos en los sistemas eléctricos, dependiendo de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y se resumen en [9]:

- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos de regulación, tanto de potencia como de control.
- Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de protección y medición.
- Interferencias en sistemas de comunicación y telemando.
- Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc.) y el cableado de potencia con la disminución consecuente de la vida útil de los mismos, e incremento considerable de pérdidas de energía.

- Fallo de capacitores de potencia. Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar accidentes eléctricos, fallas destructivas de equipos de potencia o mal funcionamiento.

### 3.6 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

THD corresponde a Distorsión Total Armónica (tasa de distorsión armónica global). La tasa de distorsión armónica es frecuentemente utilizada para definir la importancia del contenido armónico de una señal alternativa. Para una señal  $y(t)$ , la tasa de distorsión armónica está definida por la ecuación: [11]

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}{y_1} * 100\% \quad \text{Ec. 1}$$

Cuando se trata con armónicos de tensión, la expresión se convierte en:

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} * 100\% \quad \text{Ec. 2}$$

Cuando se trata con armónicos de intensidad, la expresión se convierte en:

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100\% \quad \text{Ec. 3}$$

Esta ecuación es equivalente a la mostrada a continuación, la cual es más directa y fácil de utilizar cuando se conoce el valor eficaz total:

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} * 100\% \quad \text{Ec. 4}$$

Para armónicos individuales:

$$IHD_n = \frac{V_n}{V_1} * 100\% \quad \text{Ec. 5}$$

### 3.7 DISTORSIÓN TOTAL DE DEMANDA

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. [11]

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_{Dem\max}} * 100\% \quad \text{Ec. 6}$$

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519-1992.

### 3.8 FACTOR K

En la gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, este transformador presenta sobrecalentamiento aun cuando no ha alcanzado sus KVA nominales. Se estima que el calentamiento de los transformadores debido a las armónicas es directamente proporcional al cuadrado de la armónica multiplicado por las pérdidas que esta produce, de esta manera aparece el factor K el cual es aplicado a transformadores. [11]

Este factor K viene especificado en los datos de placa de algunos transformadores, indicando la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales sin exceder la temperatura de operación a la cual están diseñados, esto es:

$$Factor\ K = \sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_{RMS}} \right)^2 h^2 * 100\% \quad Ec. 5$$

Donde la corriente de esta expresión es la corriente de la carga no lineal la cual será o es alimentada por el transformador.

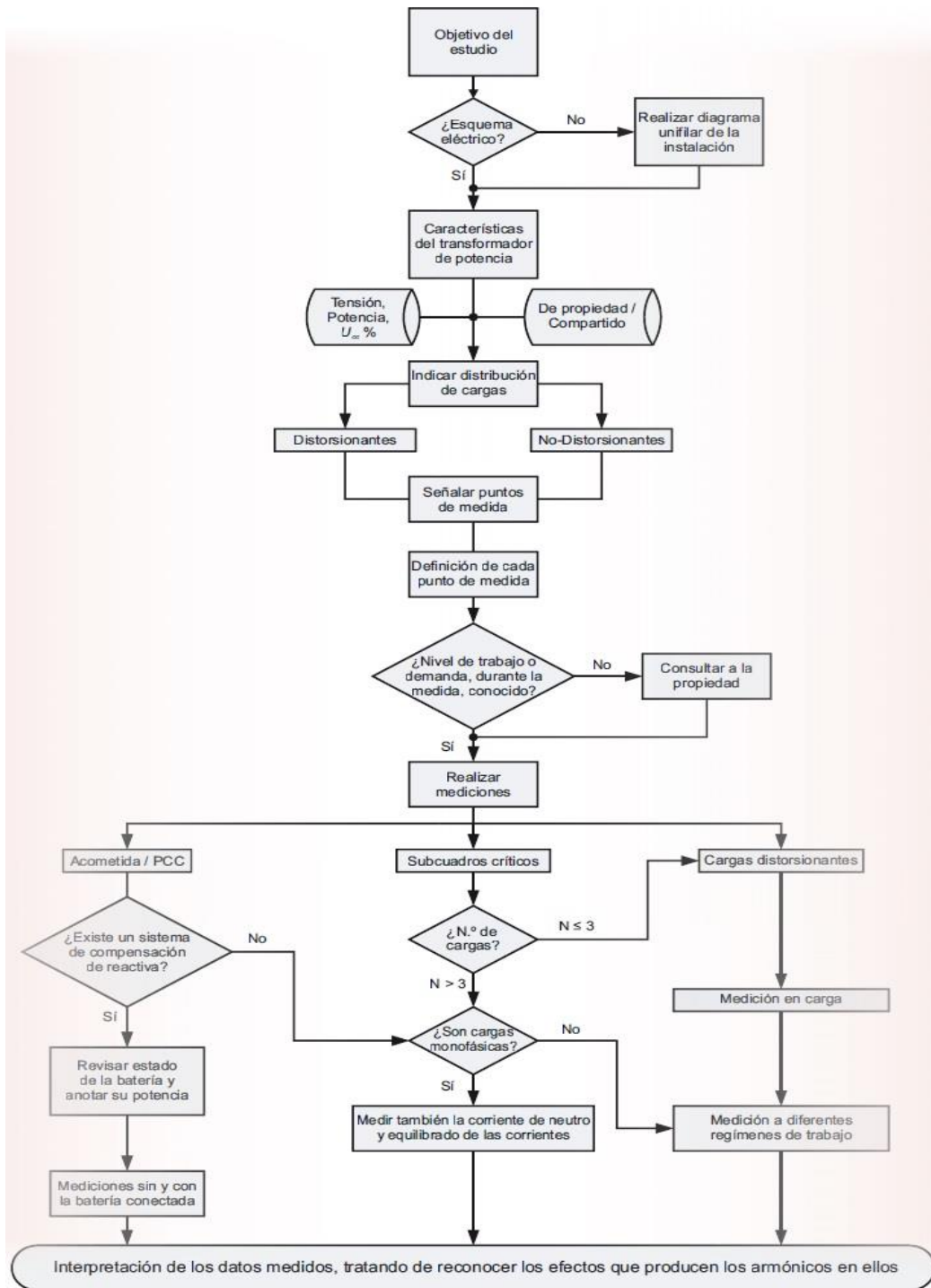
Los factores K más comunes de transformadores son de 4 y 13, los cuales son utilizados para alimentar cargas que utilizan rectificación principalmente.



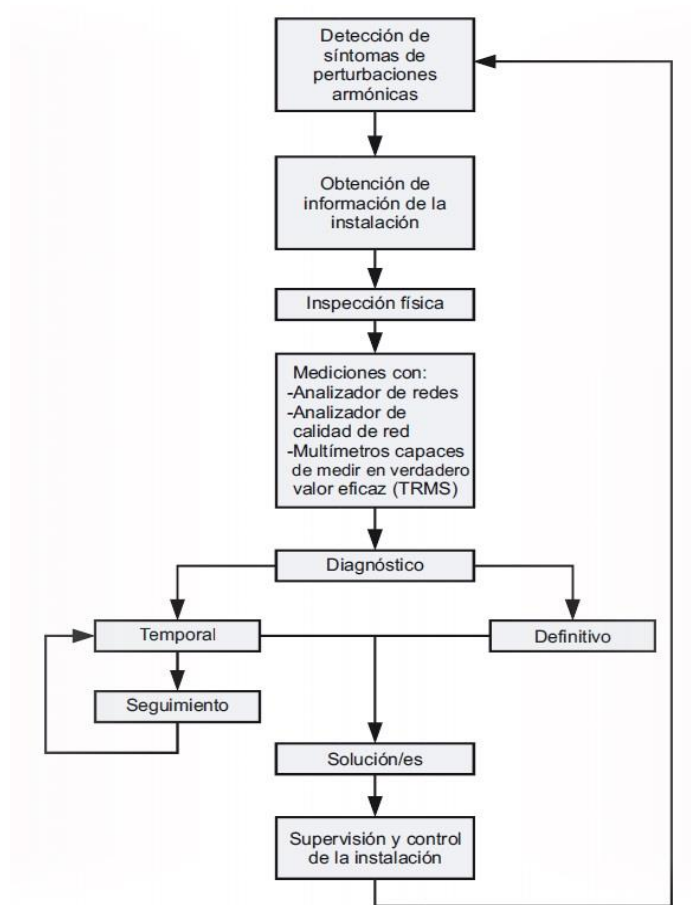
## **4 METODOLOGÍA**

### **4.1 PROCEDIMIENTOS PARA REALIZAR EL ESTUDIO**

Actualmente no existe un procedimiento normativo estándar y un orden específico para realizar el diagnóstico de armónicos en una red eléctrica, aun así, hay diferentes metodologías descritas por los mismos fabricantes de tecnología relacionada con la calidad de la energía, por lo que se selecciona un método general de fácil adaptación a la investigación en curso. El procedimiento descrito en el artículo de CIRCUTOR (empresa dedicada al diseño y fabricación de equipos para mejorar la eficiencia energética), “PROCEDIMIENTOS PARA EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DE PERTURBACIONES ARMÓNICAS”



**Figura 1 Procedimientos para realizar el estudio. [11]**



**Figura 2 Proceso de diagnóstico de la instalación. [10]**

Identificados ya los síntomas, y se tenga la información de la instalación se puede realizar un diagnóstico apropiado y aportar una o varias soluciones que sean acertadas y adaptadas a los síntomas. [10]

Posteriormente se analiza el diseño de la instalación basada en la NTC2050 que es el código aceptado nacionalmente, esto con el propósito de verificar si el sistema puede afrontar los problemas que conlleva la distorsión armónica, o por el contrario se debe tomar acción directamente sobre el diseño de la red eléctrica mediante la aplicación de factores atenuadores del fenómeno armónico. (dichos factores que no son contemplados en la NTC2050)

## **4.2 NORMAS APLICADAS AL DISEÑO DE REDES DE TIPO RESIDENCIAL**

Según la NTC2050:

- Tabla 220-3.b); cargas de alumbrado general por tipo de ocupación
- Artículos desde la sección 220-10 hasta la sección 220-19 (incluyendo tabla 220-11); Alimentadores y acometidas
- Tabla 220-19; factores de demanda para estufas eléctricas domesticas
- Calculo de transformador según la NTC 2050 por unidad de áreas ( no se realiza debido a que implica un sobredimensionamiento notable sobre el transformador)
- Calculo de transformador según la EEP (norma local) , tabla 4 de la norma EEP “demanda diversificada acumulada por estratos socioeconómicos”
- Sección 430-6; Determinación de la capacidad nominal de corriente de los motores.
- Sección 430-21 hasta la sección 430-26; Conductores para circuitos de motores.
- Tabla 250-94; puesta a tierra para sistemas.
- Tabla 250-95; puesta a tierra para equipos.

## 5 PROCEDIMIENTO PARA EL DIAGNOSTICO DE ARMÓNICOS EN LA INSTALACIÓN ELECTRICA

(Por razones de confidencialidad se omite información del nombre y ubicación del complejo residencial). Se procede a seguir los lineamientos estipulados en la figura 1 en la medida que los equipos y la información disponible lo permita.

### 5.1 OBJETIVO

Realizar análisis de los niveles de la distorsión armónica en base a mediciones realizadas con el equipo FLUKE 434.

### 5.2 ESQUEMA ELÉCTRICO.

Se presenta el diagrama unifilar simplificado del edificio donde se puede apreciar los tipos de carga conectadas.

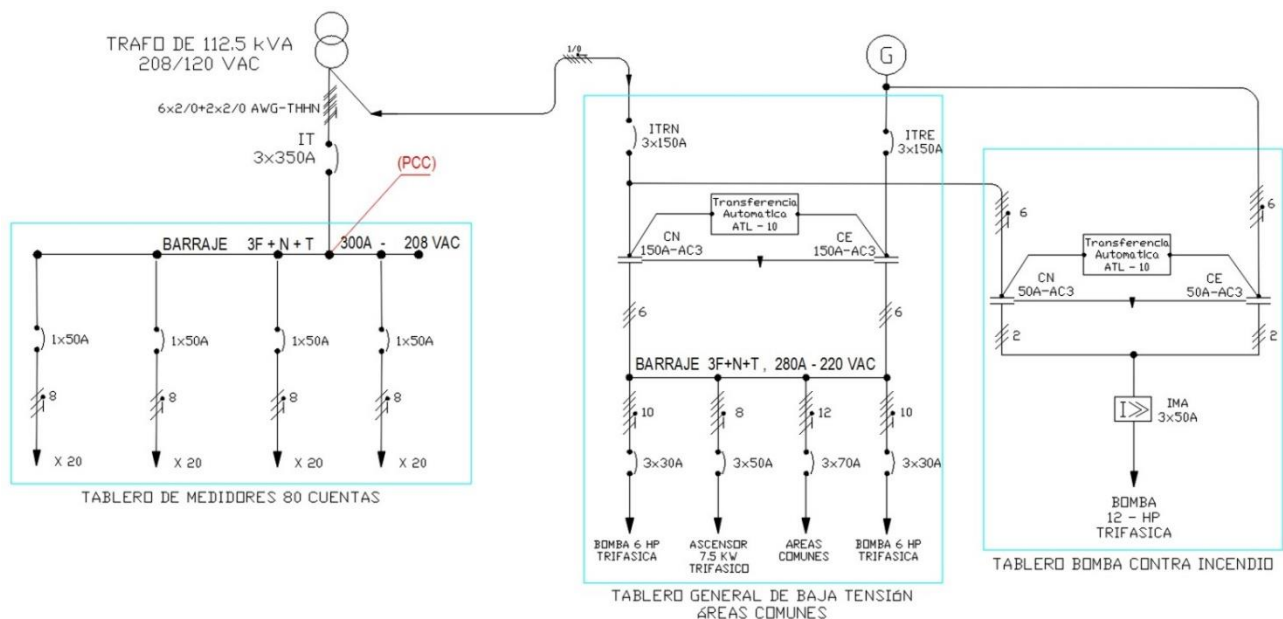


Figura 3 Diagrama Unifilar

## 5.2.1 Características del transformador de potencia

Transformador trifásico tipo poste con conexión estrella-delta 112.5 KVA, 13200/208-120V y  $U_{cc} = 4\%$

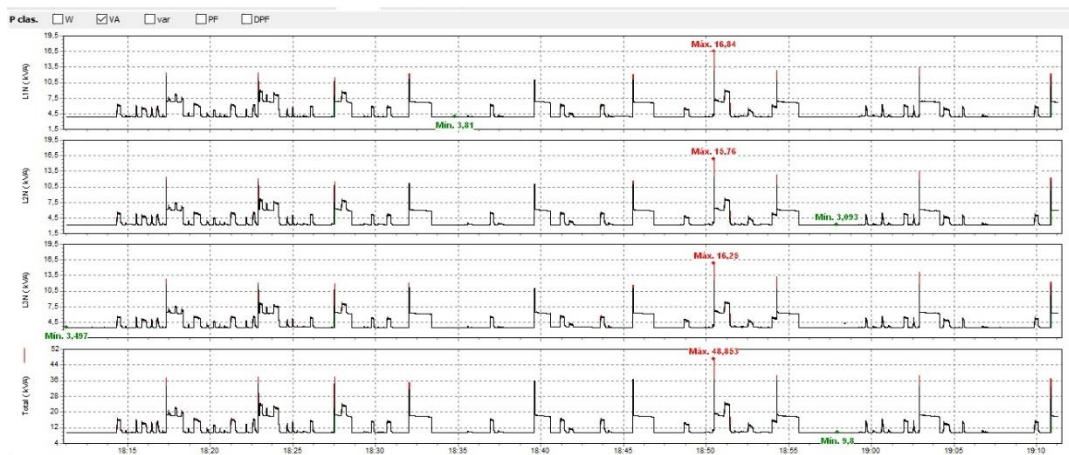
## 5.2.2 Nivel de trabajo o demanda durante la medida

Se tomaron medidas en un periodo de 5 días en horario pico, el equipo capturo datos en intervalos de 0,5 segundos durante una hora, con el fin de comprobar los picos de demanda máxima y tomar así el caso más crítico real que se presentó y con este dato efectuar el análisis. (no se toma la capacidad nominal del transformador para este punto puesto que nunca se llegó a ese nivel demanda)

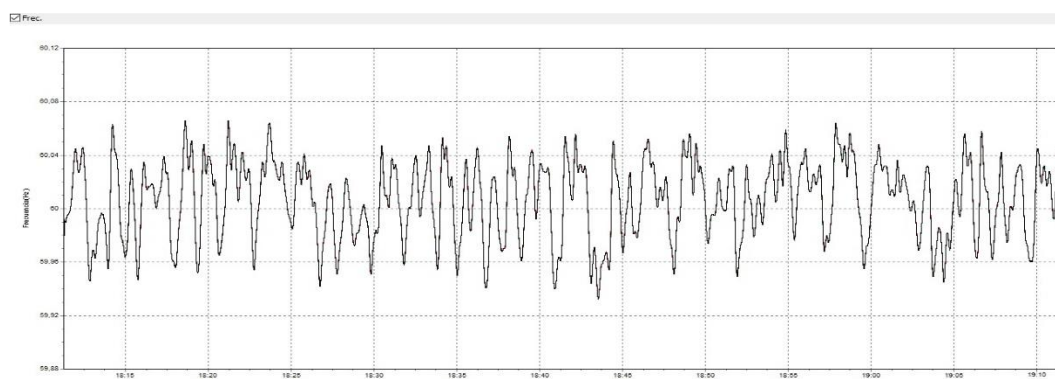
La tabla 4 representa la medida en el momento más crítico y la figura 4, figura 5 y figura 6 muestra el comportamiento de la demanda (en KVA), la frecuencia y el THDv,i respectivamente durante el tiempo de medición. (Imágenes tomadas del software de adquisición de datos Power Log Classic)

**Tabla 4 Resumen del momento más crítico tomado por el equipo FLUKE 434**

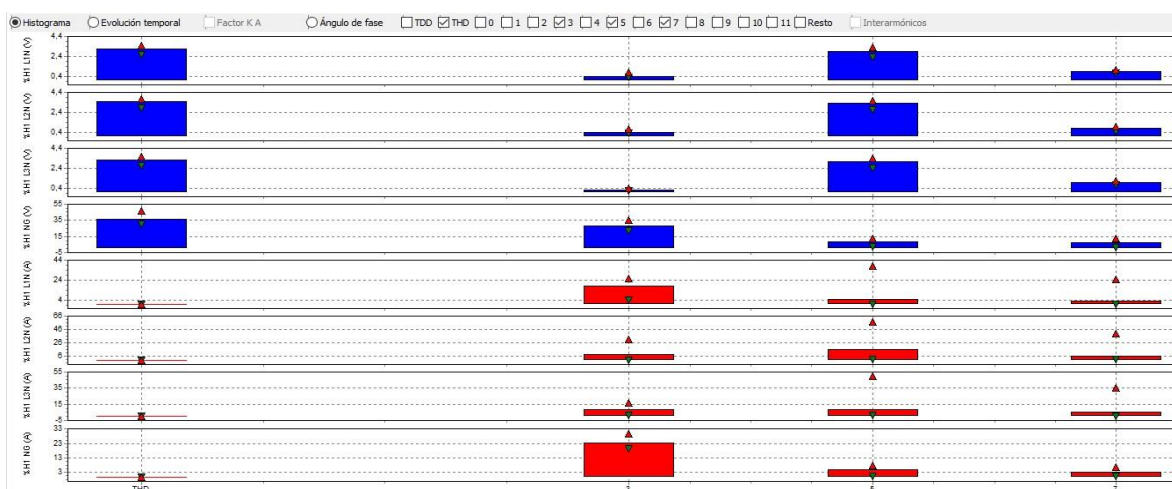
Filtro	Duración	<input checked="" type="checkbox"/> L1N(V) / L1(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L2N(V) / L2(A)	<input checked="" type="checkbox"/> L3N(V) / L3(A)	<input checked="" type="checkbox"/> LNG(V) / N(A)	<input checked="" type="checkbox"/> Total	<input type="checkbox"/> Mín.	<input type="checkbox"/> Med	<input checked="" type="checkbox"/> Máx.
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.	Total Máx.			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Tensión	120,41 V	119,41 V	120,06 V	0,03 V				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Corriente	139,9 A	131,9 A	135,4 A	2,28 A				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Tensión de Pico	167,37 V	165,98 V	165,68 V	9,83 V				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Corriente de Pico	207,05 A	196,53 A	205,81 A	3,88 A				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Factor Cresta Tensión	1,39	1,39	1,38	327,68				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Factor Cresta Corriente	1,48	1,49	1,52	1,7				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Tensión de Medio Ciclo	120,47 V	119,47 V	120,12 V	0,03 V				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Corriente de Medio Ciclo	140,34 A	132,32 A	135,83 A	2,28 A				
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Potencia Activa	16,172 kW	14,648 kW	15,281 kW		46,100 kW			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Potencia Aparente	16,845 kVA	15,750 kVA	16,256 kVA		48,852 kVA			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Potencia Reactiva	4,717 kvar	5,789 kvar	5,546 kvar		16,052 kvar			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Factor de Potencia	0,96	0,93	0,94		0,95			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Frecuencia					60,013 Hz			
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Energía Activa								
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Energía Aparente								
23/08/2017 6:50:26 p. m. 386mseg	Energía Reactiva								



**Figura 4 demanda de potencia aparente durante la noche de mayor demanda.**



**Figura 5 demanda de potencia aparente durante la noche de mayor demanda**



**Figura 6 . THD de tensión y armónicos individuales de tensión, armónico individual de la corriente expresado como porcentaje de IL**

### **5.2.3 Puntos de medición**

Las mediciones se efectuaron en el PCC entre el transformador y la carga exactamente en el punto donde se encuentran los alimentadores del tablero de medidores y el tablero general de baja tensión en la figura 3.

Se seleccionó este punto debido a que era el de más fácil acceso, además se tenía un panorama global del efecto de las cargas sobre el sistema.

### **5.2.4 Existencia de cargas monofásicas**

Gran parte de la carga es monofásica y se encuentra distribuida en los apartamentos con un tablero monofásico de 3 hilos vale la pena resaltar que durante la parte de diseño se hace lo posible para equilibrar la carga, pero se sabe que llevar esto a la realidad no es posible. La medición se puede apreciar en la tabla 1 donde es evidente el desequilibrio y de igual forma existe paso de corriente por el neutro.



## **6 INTERPRETACIÓN DE DATOS MEDIDOS.**

Durante la etapa de medida no se detectaron fallas de equipos o el sistema en general el único síntoma visible se presenta durante el momento de energización del ascensor esto se debe al variador de velocidad que posee, lo que supone un aumento de carga repentino por un pequeño intervalo de tiempo donde se cae la tensión y aumenta la corriente generando un pico; aun así este acontecimiento no alcanza a desestabilizar la red ni afecta las demás cargas dado que se tiene un sistema bastante robusto, este fenómeno se puede apreciar claramente en la figura 4.

En la figura 5 se presenta el comportamiento de la frecuencia durante el tiempo de medición y a pesar de que parece ser bastante dinámico en realidad se mantiene dentro de los niveles aceptados.

En la figura 6 se muestra el THDV y sus componentes armónicas individuales igualmente las componentes armónicas de la corriente expresada en porcentaje de la corriente de carga. (Las demás componentes armónicas no se presentaron durante la medida por esta razón en el software solo se señalan los existentes)

### **6.1 ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE LA TENSIÓN.**

Cómo se puede ver en la en las primeras 4 graficas de la figura 6 existen las componentes 3, 5 y 7 donde en las fases predomina la componente 5 y en el neutro la componente 3 como era de esperarse en sistemas alimentados por devanados conectados en estrella se suman las componentes “triples” es decir los múltiplos de 3 de la frecuencia fundamental. Es importante tener esto en cuenta durante la etapa de diseño dándole un calibre adecuado al conductor del neutro, sin embargo, para este caso en particular el transformador está muy por encima de la demanda máxima medida por ende puede soportar las componentes triples sin presentar sobrecalentamiento.

Con el propósito de diagnosticar si estas componentes armónicas se encuentran sobre los límites aceptables, la norma la IEEE Std 519™-2014 expone entre sus premisas la siguiente tabla para niveles armónicos en la tensión.

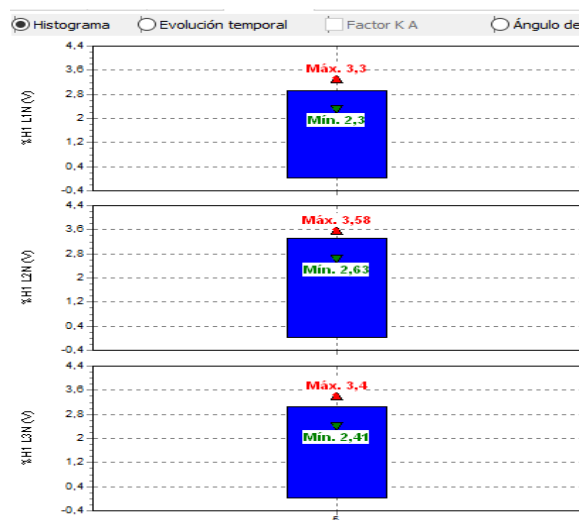
**Tabla 5 Límites de distorsión armónica de tensión**

Bus voltage $V$ at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

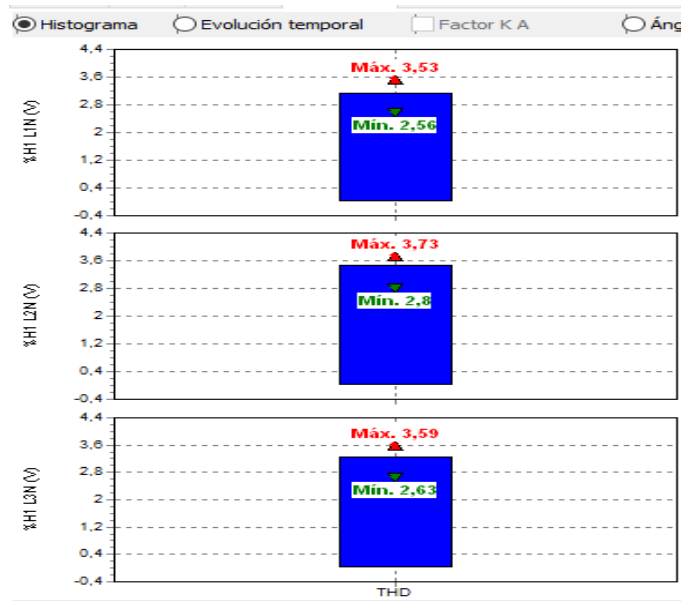
**Fuente [12]**

El nivel de tensión correspondiente para este estudio en el punto de acoplamiento común está por debajo de 1 kV donde se tiene un máximo de 5% para el armónico individual y un THD de 8%.

En conformidad con la tabla 1 se observa en la figura 7 en las fases, que el armónico individual de porcentaje más alto es el quinto con 3,58% y el THD más alto se presenta en la fase 2 con 3,73% cumpliendo así con la norma. Se visualizan más fácilmente en la figura 7 y 8 respectivamente.



**Figura 7 Armónico individual de tensión más alto**



**Figura 8 THD de tensión más alto**

De igual forma que en la tensión, en la corriente también se especifican límites para la distorsión armónica como lo muestra la tabla 6.

**Tabla 6 Límites de distorsión de la corriente para sistemas entre 120V y 69kV[4]**

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a, b</sup>						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente [12]

Donde:

ISC = corriente de corto circuito en el PCC.

IL = corriente máxima de carga de demanda (componente de frecuencia fundamental) en el PCC en condiciones de funcionamiento de carga normal.

Comúnmente cuando se realizan mediciones de THDi los porcentajes son bastante elevados por lo que es importante aprender a interpretar los datos, cuando se tiene un THDi alto no es indicativo de que el sistema tenga un contenido alto de armónicos, dado que si el sistema se encuentra con una demanda baja comparada con su capacidad, la distorsión armónica también es baja.

El dispositivo de medición toma como corriente de carga la que en ese momento está pasando y no la máxima de carga en funcionamiento normal.

La norma no logra ser lo suficientemente clara en este aspecto

Inicialmente se calcula la relación de corto circuito  $ISC/IL$ .

El dato de la corriente de corto circuito puede ser suministrado por la empresa de energía prestadora del servicio en este caso la Empresa de Energía del Pereira (EEP).

Si se presentan dificultades para acceder a esta información, dicha corriente se debe estimar tomando como modelo la potencia del transformador y la impedancia de corto circuito que este tenga en sus características, normalmente 4% para menores de 600kVA (esta forma aplica para el caso de diseño).

Para este caso el dato fue suministrado por la empresa en el nodo donde se encuentra conectado el transformador

$$ISC(3\emptyset) = 2,38 \text{ kA cto \#5 Ventorrillo}$$

Para determinar la corriente de corto circuito en el barraje del PCC en el tablero general de baja tensión se procede a realizar el cálculo para referir la corriente teniendo en cuenta las características del conductor, del barraje y del transformador.

El procedimiento realizado se encuentra en el “Cuaderno Técnico n° 158” de Shneider Electric, método de las impedancias y dado que es un cálculo bastante extenso se automatizo en un archivo de Excel.

**Tabla 7 impedancias aguas arriba**

IMPEDANCIAS AGUAS ARRIBA		
U=	Tensión en vacío MT =	13200
U=	Tensión en vacío BT=	208
Icc SIMETRICA TRIFASICA	2380	
Icc SIMETRICA MONOFASICA	1260	
Scc=	54.414.108	
Za=	$(U^2/Scc) =$	3,202110737
Ra/Za=	0,3 para 6kV	
Ra/Za=	0,2 para 20kV	
Ra/Za=	0,1 para 150kV	
Xa=	$0.98*Za =$	3,138068522
Ra=	$0,2*Za$	0,640422147
XaBT	0,00077919	
RaBT	0,00015902	
ZaBT	0,00079525	

**Tabla 8 . Impedancias del transformador**

IMPEDANCIAS TRANSFORMADOR		
Ucc	4,0%	112,5
U (V)=	208	
Sn (kVA)=	112,5	
Nº de trafos en paralelo	1	
Zt=	$U^2/(Sn*N^{\circ}tra)$	0,015382756
Xt=Zt	0,015382756	
Rt=	$0,2*Xt=$	0,003076551

**Tabla 9 impedancias del barraje y el interruptor**

IMPEDANCIAS BARRAJES EN CABLE COBRE		
L (mts)=	40	CABLES UNIPOLARES COLOCADOS EN TRIANGULO
# CONDxFASE	2	
CABLE AWG	N°2/0	
Xbarraje=	0,017	
Rbarraje=	0,005843	
IMPEDANCIAS INTERRUPTOR		
Xint=	0,00015	

**Tabla 10 Icc Max en el tablero general de baja tensión**

FALLA EN BARRAJES ML PRINCIPAL	
XA=	0,03331194
RA=	0,00907857
ZA=	0,034526886
I"K=	3.478,13
RA/XA =	0,272531958
K=	1,452661946
IsCC MAX=	7.145,37

Se procede a determinar IL, dado que esta corriente es la máxima en operación normal se toma el dato de la tabla 1. Donde se observa que en ese punto se trabaja a la frecuencia fundamental.

$$IL=139.9 \text{ A}$$

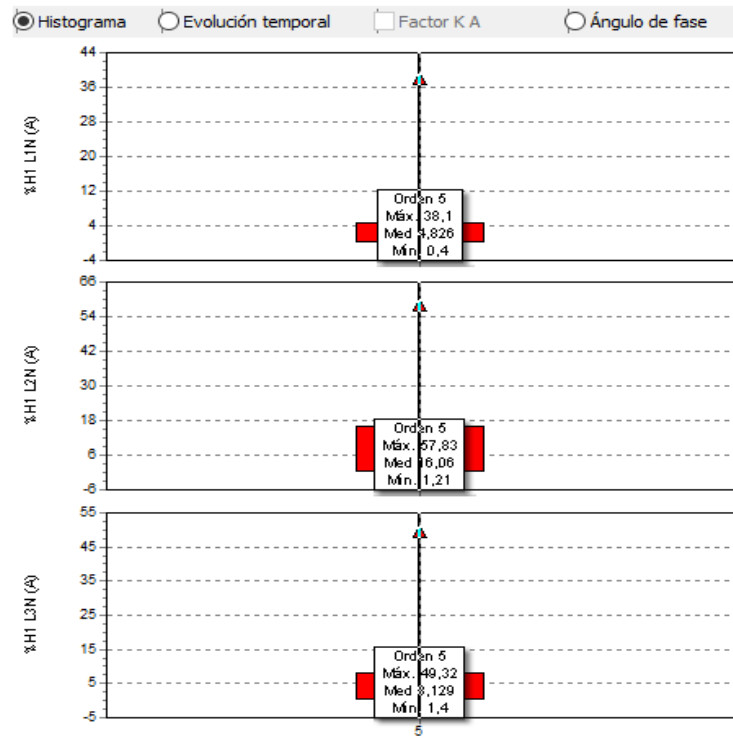
Se obtiene:

$$ISC/ IL = 7145.37/139.9 = 51.07$$

De acuerdo a la tabla 6. Se obtiene un TDD = 12%

Se procede a determinar cual fue el armónico de más peso dado que si este cumple los demás también cumplen y teniendo en cuenta que el desbalance de carga por las líneas no es alarmante.

Según la figura 6 por la escala y los triángulos rojos señala que el máximo porcentaje existe en el quinto armónico en la línea 2, en la figura 13 se visualiza mejor la situación



**Figura 9 Máximo porcentaje armónico individual de la corriente**

Se tiene que el porcentaje de armónico individual es de 57,83% de la corriente de carga, este dato se verifica en el gráfico de distorsión en el modo evolución temporal para encontrar el tiempo exacto de ocurrencia.



**Figura 10 Momento exacto de ocurrencia del armónico**



Ya determinado el momento exacto se busca el resumen en la base de datos y del software para comprar los parámetros de corriente en ese momento que circula por la fase 2.

**Tabla 11 Corriente de carga durante la distorsión armónica**

Filtro		Duración					Total		Min.	Med	Máx.
Fecha	Función	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Máx.	LNG(V) / N(A) Máx.	Total Máx.					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Tensión	120,3 V	121,2 V	121,04 V	0,02 V						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Corriente	31,01 A	25,05 A	33,9 A	1,06 A						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Tensión de Pico	146,77 V	147,86 V	148,88 V	6,55 V						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Corriente de Pico	41,86 A	33,57 A	45,77 A	1,48 A						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Factor Cresta Tensión	1,22	1,22	1,23	327,68						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Factor Cresta Corriente	1,35	1,34	1,35	1,4						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Tensión de Medio Cido	120,33 V	121,23 V	121,07 V	0,03 V						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Corriente de Medio Cido	31,17 A	25,18 A	34,08 A	2,28 A						
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Potencia Activa	3,693 kW	2,975 kW	4,062 kW		10,731 kW					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Potencia Aparente	3,731 kVA	3,036 kVA	4,103 kVA		10,870 kVA					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Potencia Reactiva	0,526 kvar	0,604 kvar	0,579 kvar		1,709 kvar					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Factor de Potencia	0,99	0,98	0,99		0,99					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Frecuencia					59,984 Hz					
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Energía Activa										
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Energía Aparente										
23/08/2017 6:59:24 p. m.	244mse Energía Reactiva										

Se tienen los siguientes datos:

$$IL_{\max} = 131,9A$$

$$\%H5 = 57,83\%$$

$$IL(H5) = 25,05A$$

Se halla IL(H5) como porcentaje de ILmax =18,9%

Ahora se halla el verdadero porcentaje de H5

$$\%H5(\text{real}) = 57,83\% (0.189) = 10,92 < 12$$

Por lo que cumple con el apartado de la norma en la tabla 3.

## 6.2 ANALISIS DEL DISEÑO DE REDES ELECTRICAS RESIDENCIALES SEGÚN LA NORMA ACTUAL (NTC2050)

El diseño de redes eléctricas residenciales en Colombia viene normalizado según lo estipulado en la norma NTC2050, todo lo relacionado con la carga instalada al interior de

las viviendas esta especificado, por ej. La carga que se debe considerar para circuitos de lavandería y plancha, pequeños artefactos de cocina, estufas eléctricas, aire acondicionado etc. Esto hace que poco a poco el sistema aumente su capacidad generalmente más de lo necesario. Así mismo ocurre en el dimensionamiento de transformadores para el sector residencial donde su selección según la NTC2050 es de carga por unidad de área, que incrementa considerablemente los KVA en comparación con el tipo de carga que se tiene a nivel residencial. A esto se le debe sumar factores de aumento en los equipos como bombas, ascensores, equipos para la extinción de incendios.

En el dimensionamiento del transformador para el caso local interviene la Empresa de Energía de Pereira (EEP) con la exigencia de la aplicación de la tabla de demanda diversificada que dependen del estrato socioeconómico; cabe resaltar que se trata calculo más ajustado a la realidad puesto que cuenta con estadísticas históricas.

Aun así, cuando se dimensiona un transformador siguiendo estos lineamientos a veces es complicado lograr la aprobación por parte de la empresa debido al sobredimensionamiento y pérdidas que esto conlleva para la empresa por no alcanzar niveles de cargabilidad aceptables.

Para comprobar esto a continuación se presenta el cálculo para el edificio residencial del estudio de armónicos anterior.

**Tabla 12 Memorias de cálculo edificio (estimación del transformador)**

MEMORIAS DE CALCULO - EDIFICIO					
Descripcion	Tomacorriente	Carga x Salida	Iluminacion	Carga de Alumb	Potencia
Sotano 1	0	180	17	118	2006
Sotano 2	0	180	17	118	2006
Sotano 3	0	180	12	118	1416
Escaleras	0	180	12	23	276
Corredor piso 1	0	180	10	23	230
Corredor piso 2	0	180	7	23	161
Corredor piso 3	0	180	7	23	161
Corredor piso 4	0	180	7	23	161
Corredor piso 5	0	180	7	23	161
Corredor piso 6	0	180	7	23	161
Corredor piso 7	0	180	7	23	161
Gimnasio	6	180	4	23	1172
Administración	2	180	2	23	406
Salon Social	6	180	8	23	1264
Porteria	8	180	4	23	1532

<b>11274</b>
--------------

Calculo acometida General			
DETALLE	FACTOR	POTENCIA	UNIDAD
Numero total de cuenta estrato 4 (80 cuentas)	1,08	86400	W
Carga Areas Comunes	80%	9019,2	W
Motor Ascensor	100%	7500	W
Motor bomba contra incendio( 12 HP )	100%	8952	W
Motor bombas sistema acuedutos( 2 - 6,1 HP )	100%	9102	W

Carga General	120973,2	W
Corriente total	335,79	A

Conductor Acometida General	335,79	----->	(2)1/0 por fase - cobre - THHN
Proteccion	350,00		
Capacidad del transformador	112,5	----->	Transformador Trifasico de 112,5 kVA

Como se puede observar el diseño cumple con la normatividad actual, pero si se compara con las mediciones realizadas y la carga máxima alcanzada (ver tabla 1), se ve que difícilmente llega al 50% de la capacidad total, en ocasiones esto fuerza al diseñador a aplicar u omitir ciertas consideraciones de la norma (este no es el caso).

En definitiva, existen perdidas económicas de parte del prestador del servicio de energía, así como del constructor de la obra. Actualmente se está a la expectativa de una actualización donde se haga un reajuste más considerado sin perder calidad, seguridad y confiabilidad.

Ahora, si se realiza un diseño considerando el efecto de los armónicos y la norma NTC2050 (a nivel residencial). Ya se está haciendo referencia a un sistema aún más robusto.

Con el aumento exagerado de dispositivos electrónicos que inyectan armónicos a sistema algunos diseñadores plantean tomar medidas para mitigarlos desde la etapa de diseño, pero

el desconocimiento del tipo de carga que va ser utilizada representa una dificultad para el diseñador y todo se basaría en estimaciones que posiblemente no sean necesarias.

Vale la pena resaltar que la NTC2050 no trata el tema del fenómeno armónico de manera profunda. Solo emite ciertas consideraciones a tener cuenta en el dimensionamiento del neutro para circuitos que alimentan cargas no lineales; he aquí algunas.

**Sección 210-4) Circuitos ramales multiconductores:** nota: la instalación trifásica de potencia tetrafilar o conectada en estrella utilizada para alimentar cargas no lineales puede requerir de un diseño de un sistema de potencia que permita corrientes en el neutro con alto contenido de armónicos.

**Sección 220-22) carga del neutro del alimentador:** un sistema tetrafilar conectado en estrella utilizado para conectar cargas no lineales que el sistema este diseñado de modo que permita que pase por el neutro corrientes con alto contenido de armónicos.

**Sección 310-4) conductores en paralelo; excepción 4:** se puede aprovechar para disminuir el calentamiento de los conductores del neutro en las instalaciones existentes causado por corrientes de alto contenido de armónico con el tercer orden.

**Sección 310-10) límites de temperatura de los conductores 2:** El calor generado interiormente en el conductor por el paso de la corriente, incluidas las corrientes fundamentales y sus armónicos.

Existen otros que básicamente tratan el mismo propósito el cual es considerar el neutro como un conductor portador de corriente debido a que a través de este circulan corrientes armónicas.

Como se pudo observar en la recolección de datos del diseño, el sobredimensionamiento típico planteado por la NTC2050 puede darle a la red eléctrica la robustez necesaria para dejar de a un lado el fenómeno armónico a nivel residencial.

Algunas de las recomendaciones a la hora de proponer soluciones para la distorsión armónica son por ej. Sobredimensionar el neutro, aplicar factores de peso armónico a la iluminación LED, UPS's, tomacorrientes regulados etc. Sin embargo, se puede citar el caso del diseño de la instalación residencial de este artículo, donde se cumple a cabalidad con la norma IEEE Std 519<sup>TM</sup>-2014 sin haber considerado el efecto armónico durante la etapa de diseño.

## 7 CONCLUSIONES

- El THDv es un indicativo bastante acertado para diagnosticar presencia de armónicos en una instalación debido a que hace referencia a la regulación de tensión que es un concepto tratado por las demás normas.
- El THDi debe ser tratado con precaución ya que no siempre es indicador de la existencia de armónicos que afecten la red, sus niveles altos cuando la demanda es baja indica que su impacto en el sistema también es bajo.
- En zonas residenciales si existen equipos generadores de armónicos que deben ser considerados por lo que es mejor realizar la medida directamente sobre el equipo si así se requiere esto con el propósito de descartar posibles fallos o facilitar su solución.
- Es fundamental interpretar de manera adecuada las mediciones efectuadas con el fin de realizar un buen diagnóstico. Diferenciar cada componente armónica y cuál puede ser su causante de esta forma se reduce el tiempo y costo si la solución es oportuna.
- No es viable tener en cuenta el efecto de los armónicos a la hora de realizar un diseño tipo residencial puesto que no se tiene la certeza del comportamiento de la carga, esto podría incurrir en un sobre costo por sobredimensionamiento de la red innecesario. Por lo que se recomienda dicho estudio con la instalación en funcionamiento.

## **8 RECOMENDACIONES**

- Se recomienda de realizar un análisis de armónicos así la instalación sea nueva ayuda a resolver posibles fallos a futuro, ya que expone falencias del sistema que se pueden acumular causando averías que afectan equipos o directamente a personas.
- Las normas pueden prestarse para diferentes interpretaciones y de no tener seguridad en su manera de aplicación, es conveniente consultar con un profesional con experiencia en el tema.

## 9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Circutor, «Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas,» [En línea]. Available: [http://circutor.com/docs/procedimientos\\_sp.pdf](http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf).
- [2] M. Brugnioni, «Componentes armónicos de la demanda y sus efectos sobre las redes de distribución eléctrica,» Grupo energía y ambiente Depto de electrotecnia Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [3] C. Valenzuela y R. Vidal, «Análisis de Armónicos en redes de distribución,» [En línea]. Available: [http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2010/valenzuela\\_c/doc/valenzuela\\_c.pdf](http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2010/valenzuela_c/doc/valenzuela_c.pdf).
- [4] J. LUNDQUIST, «On Harmonic Distortion in Power Systems,» 2001. [En línea]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.531.4194&rep=rep1&type=pdf>. [Último acceso: 2017].
- [5] G. Reyes Calderon , «Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica,» 1996. [En línea]. Available: <http://eprints.uanl.mx/7622/1/1020115478.PDF>. [Último acceso: 2017].
- [6] «Los armónicos en las instalaciones eléctricas,» [En línea]. Available: [file:///C:/Users/s/T025%20LOS%20ARMONICOS%20EN%20LAS%20INSTALACIONES%20ELECTRICAS\\_unlocked.pdf](file:///C:/Users/s/T025%20LOS%20ARMONICOS%20EN%20LAS%20INSTALACIONES%20ELECTRICAS_unlocked.pdf). [Último acceso: Enero 2017].
- [7] «Armónicos en las redes eléctricas,» Universidad politecnica salesiana.
- [8] C. E. Pérez Nicho y E. Villegas , Análisis de Armónicos en un sistema de Distribución.
- [9] Skvarenina, Power Electronic Handbook, 2004.
- [10] «Circutor, Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas,» [En línea]. Available: [http://circutor.com/docs/procedimientos\\_sp.pdf](http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf).
- [11] «ARMONICOS EN REDES ELECTRICAS, capitulo II,» UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA, [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=384495](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/EL5203/1/material_docente/bajar?id_material=384495).



- [12] IEEE Std 519™-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.